

第四篇 同步电机之

第十五章

同步电机的突然短路与振荡

授课教师：花为

东南大学电气工程学院电机与电器系

Email: huawei1978@seu.edu.cn

http://ee.seu.edu.cn/te_187.htm

第十五章

同步电机的突然短路与振荡

- 突然短路的物理过程（掌握）
- 瞬态电抗和超瞬态电抗（掌握）
- 三相突然短路电流（了解）
- 同步电机振荡的物理概念（了解）

1.同步电机突然短路的物理过程

突然短路的直观影响

- 各绕组出现很大的冲击电流，峰值可达额定电流的十倍以上
- 在电机内产生很大的电磁力和电磁转矩
- 可能损坏绕组端部，或使转轴发生有害变形，破坏电网的稳定运行

1.同步电机突然短路的物理过程

主要原因

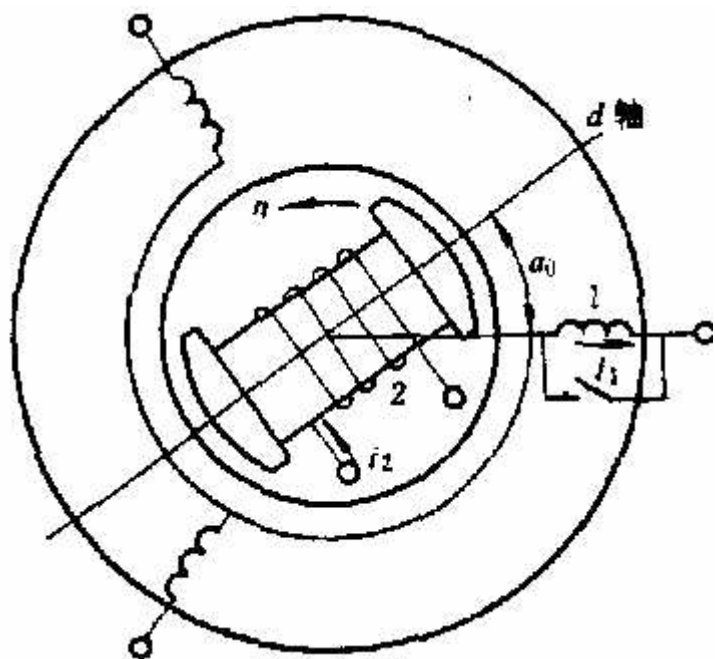
突然短路是一个暂态过程：从正常运行到稳定短路的过渡阶段。

短路电流中包含有自由分量：按一定时间常数衰减；当自由分量衰减完毕，即进入稳定短路。

突然短路时，电枢（定子）电流和相应的电枢磁场幅值发生突然变化，定、转子绕组间产生变压器感应关系，在转子绕组中感应电势和电流，反过来又影响定子绕组的电流。

1.同步电机突然短路的物理过程

超导体闭合回路磁链守恒原理



- 合上开关，使定子绕组1短路，有

$$ir + \frac{d\psi}{dt} = 0$$

- 不计电阻 r_1 ，则 $\frac{d\psi}{dt} = 0$

即 $\psi = \text{const}$

设 $t=0$ 时磁链为 $\psi_{t=0}$ ，则 $\psi = \psi_{t=0}$

在没有电阻的闭合回路中，
磁链将保持不变

磁链不能突变，

在突然短路瞬间，认为磁链保持不变（类似超导体情况）

1.同步电机突然短路的物理过程

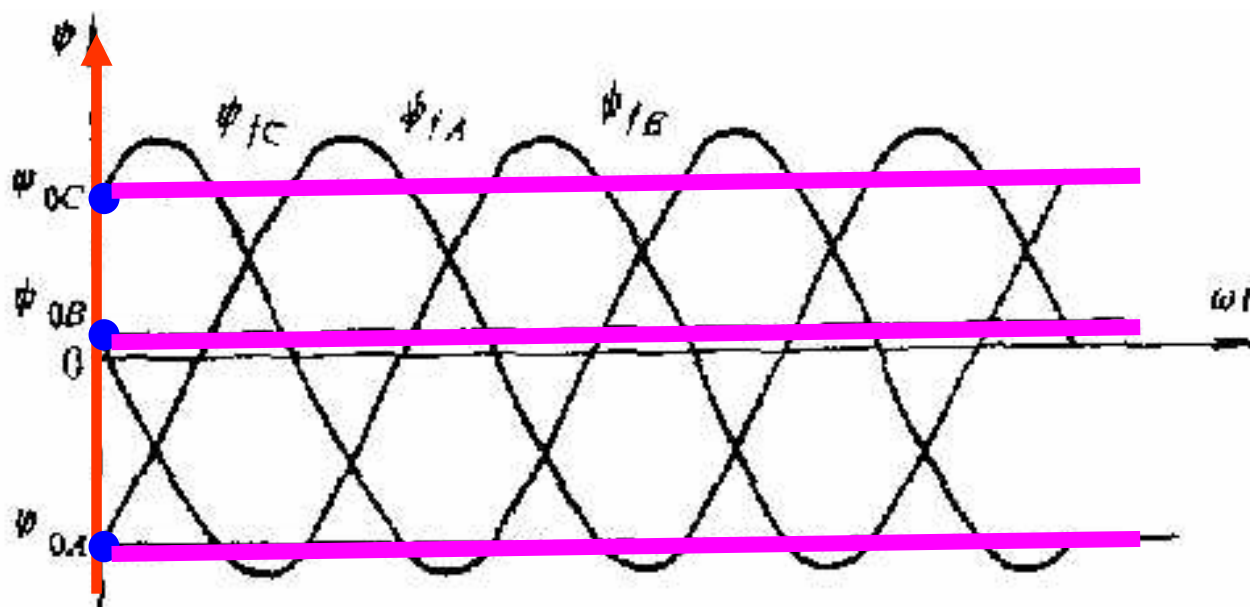
分析时的假设：

- (1) 不考虑机械过渡过程：在过渡过程期间，电机的转速保持为同步速不变；
- (2) 利用叠加原理：电机的磁路不饱和；
- (3) 突然短路前为空载运行，突然短路发生在发电机的出线端；
- (4) 不考虑强励的情况：发生短路后，励磁系统的励磁电流 I_{f0} 始终保持不变。

1.同步电机突然短路的物理过程

三相突然短路时的磁链

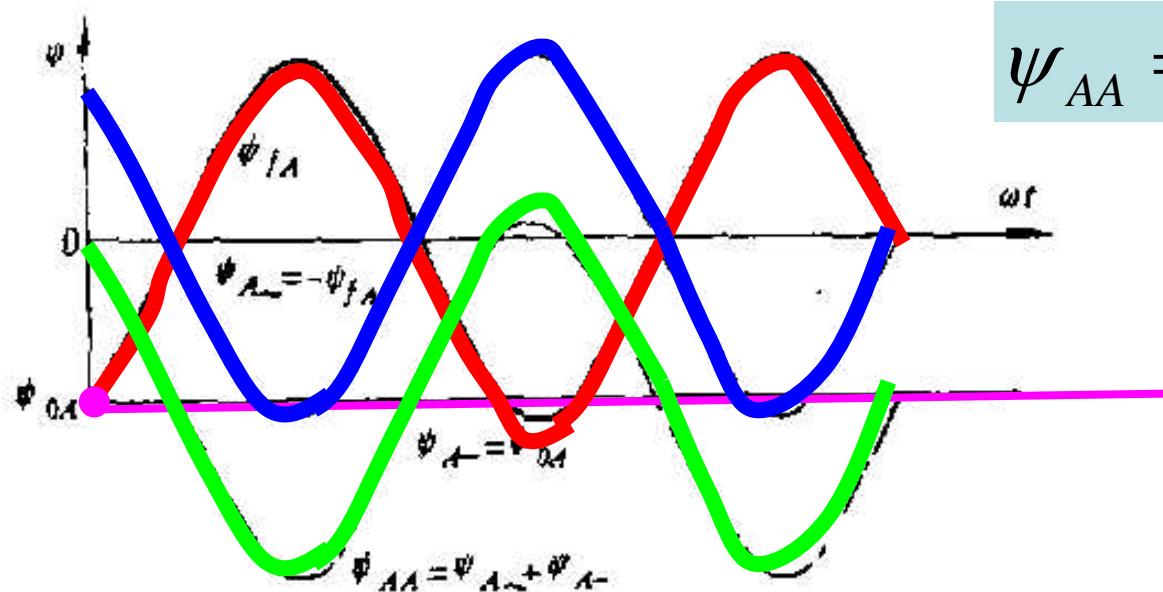
- 空载时，转子旋转磁场在定子绕组中形成磁链
- $t=0$ 发电机端点发生突然短路，磁链为 ψ_{0A} 、 ψ_{0B} 、 ψ_{0C}
- 根据磁链不变原则，各绕组磁链将保持而不随时间变化（忽略电阻的作用）



1.同步电机突然短路的物理过程

$t > 0$ 时的磁链守恒

- 转子继续以同步转速旋转，转子磁场对定子绕组形成的磁链 ψ_{fA} 、 ψ_{fB} 和 ψ_{fC} 始终按正弦规律变化
- 定子各绕组的磁链要保持不变，需由已闭合的定子绕组中产生感应电流，由该电流分别在各相绕组中建立磁链 ψ_{AA} 、 ψ_{BB} 和 ψ_{CC} 以克服磁链的变化



$$\psi_{AA} = \psi_{+} + \psi_{-}$$

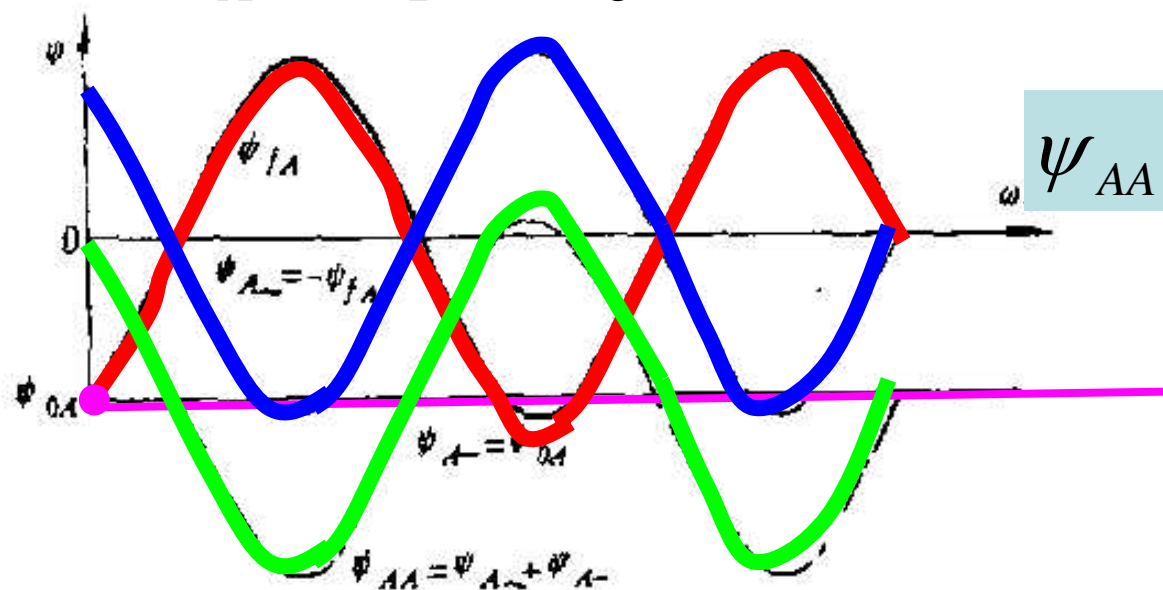
1.同步电机突然短路的物理过程

定子电流分量

➤ 交流分量 $i_{A\sim}$ 、 $i_{B\sim}$ 、 $i_{C\sim}$

在定子各相绕组中产生磁链 $-\psi_{fA}$ 、 $-\psi_{fB}$ 和 $-\psi_{fC}$ ，以抵消转子磁场的作用，使定子绕组的磁链为零

➤ 直流分量 i_{A-} 、 i_{B-} 、 i_{C-} 产生不变的磁链



1.同步电机突然短路的物理过程

转子电流分量

- 由于定子电流产生的旋转磁场和直流磁场的出现，转子磁链守恒将被破坏 (ψ_{ff})，转子电路中必将引起感应电流以建立恰能抵消上述磁场对转子绕组形成的磁链
- 定子绕组交流分量产生的合成磁场 ψ_{\sim} ，同步旋转，与转子相对静止，转子产生直流分量 I_{f-} ，以抵消磁链 ψ_{\sim}
- 定子电流直流分量产生磁场（静止），与转子相对转速为同步速，转子中匝链磁链 ψ_{-} ，感应出工频交流电势和交流电流分量 $I_{f\sim}$ ，以抵消 ψ_{-}

$$\psi_f = \psi_{ff} + \psi_{f-} + \psi_{f\sim}$$

$$i_f = I_{ff} + I_{f-} + I_{f\sim}$$

1.同步电机突然短路的物理过程

考虑绕组电阻后的影响

- 实际情况下，定子、转子回路均有电阻存在，所以各瞬态电流分量均将按一定时间常数衰减，并最后消失
- 这时定子电流将是稳态短路电流
- 转子回路将是正常外施的励磁电流

2. 瞬态电抗和超瞬态电抗

电抗的概念

- 任一线圈产生一定数量磁通所需的电流大小将因磁通所走的路径不同而大不相同
- 为产生同样的磁通
 - 如磁阻较小，所需电流较小，即有较大的电抗
 - 如磁阻较大，所需电流较大，即有较小的电抗

I 直轴瞬态电抗 x_d'

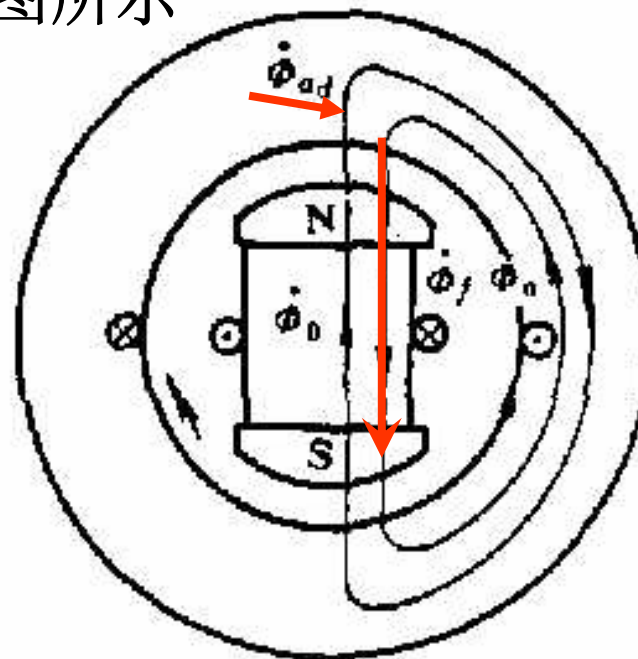
➤ 稳定短路时

端电压等于零，电枢反应为纯去磁作用。

不计电枢电阻和漏磁通的影响，由定子电流所产生的电枢反应磁通与由转子电流所产生的磁通，大小相等，方向相反，电枢反应磁通所经的路线如图所示

电枢反应磁通将穿过转子铁芯而闭合，磁阻较小

定子电流所遇到的电抗等于同步电抗 x_d (数值较大)



(a) 稳定短路

I 直轴瞬态电抗 x'_d

➤ 突然短路初瞬

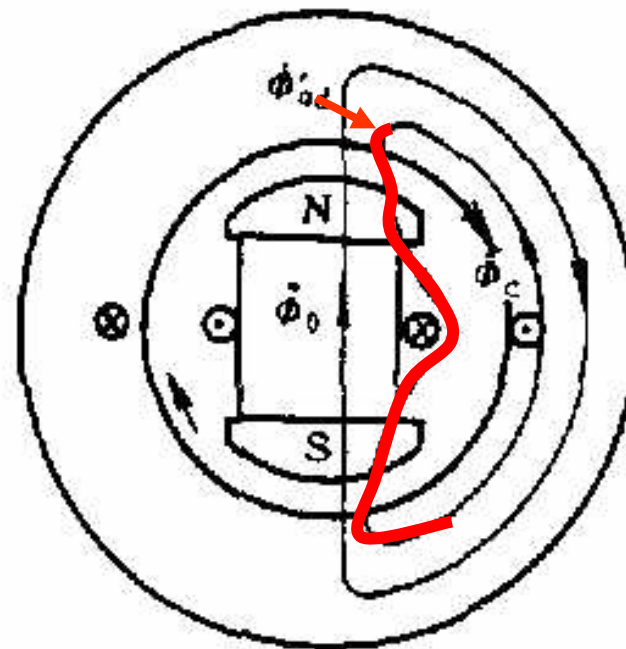
转子磁链不能突变

转子中产生一磁化方向与电枢磁场方向相反的感应电流，其磁通抵消要穿过转子绕组的电枢磁通。

等效：电枢磁通从转子绕组外侧的漏磁路通过

电枢反应磁通将从转子绕组外漏磁路而闭合，所遇到的磁阻较大

定子电流所遇到的电抗为直轴瞬态电抗 x'_d （数值较小）



(b) 突然短路初瞬

II 直轴超瞬态电抗 x_d''

➤ 突然短路初瞬

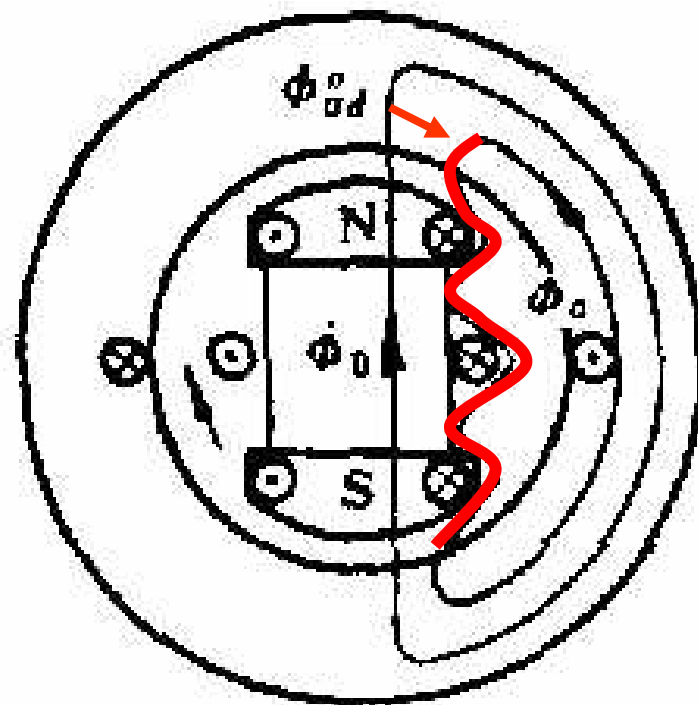
转子磁链不能突变

如转子上有阻尼绕组，其磁链也不能突变。

等效：电枢磁通从阻尼绕组和转子绕组外侧的漏磁路通过

电枢反应磁通将从转子外漏磁路而闭合，所遇到的磁阻更大

定子电流所遇到的电抗为直轴超瞬态电抗 x_d'' （数值更小）



III x''_d 和 x'_d 的表示式

- 设 Λ_{ad} 代表空气隙的磁导, Λ_{1d} 代表阻尼绕组旁的漏磁路的磁导, Λ_f 代表励磁绕组旁的漏磁路的磁导

$$\Lambda''_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_f} + \frac{1}{\Lambda_{1d}}}$$

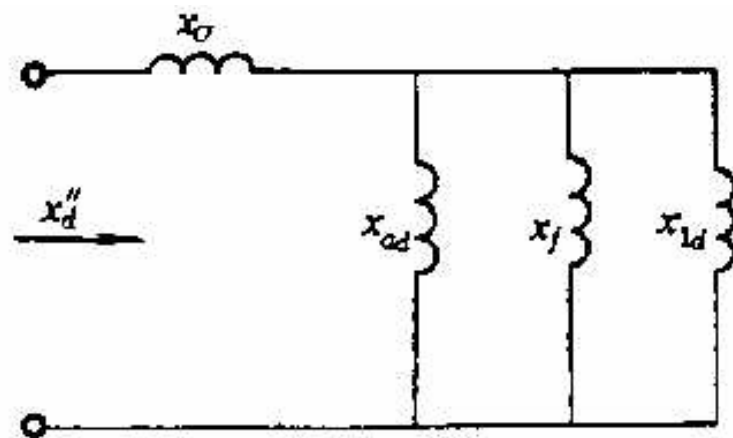
$$\Lambda''_d = \Lambda_\sigma + \Lambda''_{ad} = \Lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_f} + \frac{1}{\Lambda_{1d}}}$$

III x''_d 和 x'_d 的表示式

电抗与磁导成正比

则:
$$x''_d = x_\sigma + x''_{ad} = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_{ld}}}$$

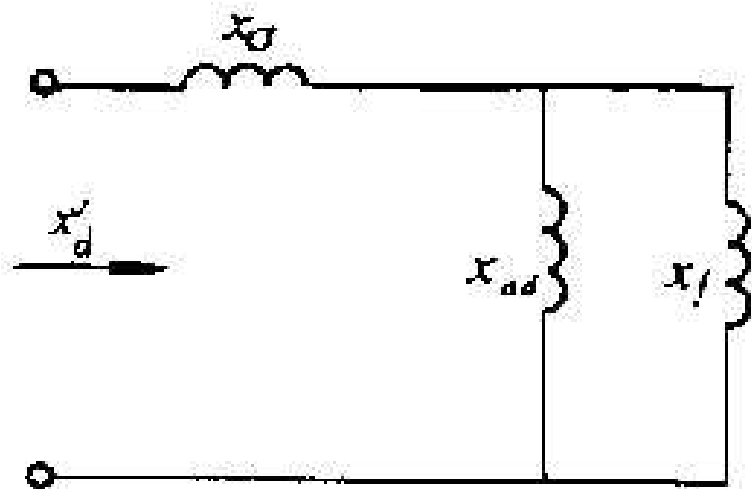
等效磁路



III x''_d 和 x'_d 的表示式

$$\Lambda'_d = \Lambda_\sigma + \Lambda'_{ad} = \Lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_f}} \quad x'_d = x_\sigma + x'_{ad} = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f}}$$

等效磁路



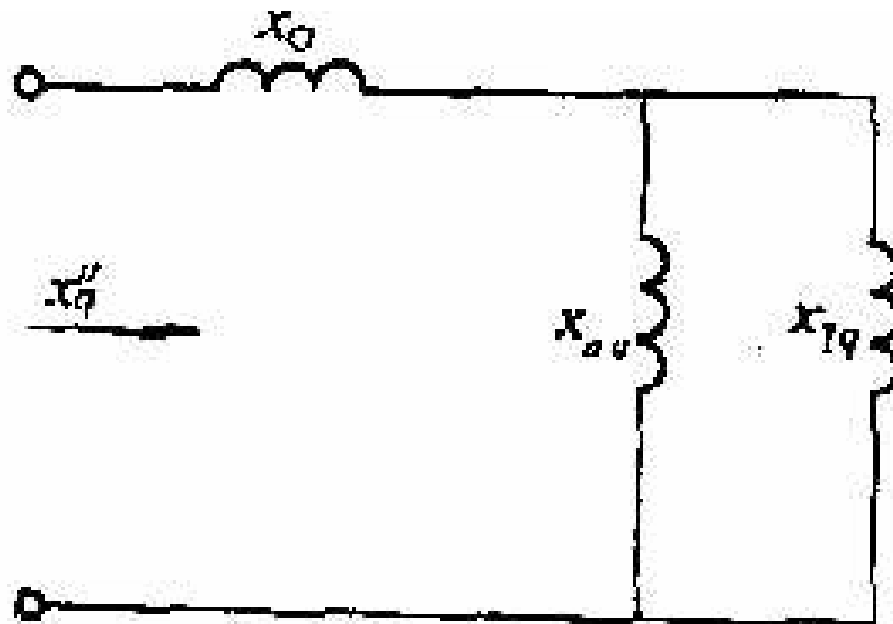
IV 交轴瞬态电抗 x'_q 及其表示式

- 如短路不是发生在出线端而是经过负载阻抗短路，则短路电流中有交轴分量，产生交轴电枢磁场
- 由于交轴方向无励磁绕组，交轴瞬态电抗和交轴同步电抗相等

$$x'_q = x_q$$

V 交轴超瞬态电抗 x''_q 及其表示式

- 由于阻尼绕组的不对称性，在交轴方向有阻尼绕组作用（且与直轴方向作用不等）



阻尼绕组在交轴的漏抗

$$x''_q = x_\sigma + \frac{x_{aq} x_{1q}}{x_{aq} + x_{1q}}$$

VI 超瞬态电抗与负序电抗间的关系

➤ 对于负序电流，其电枢磁场与转子绕组有 $2n_1$ 的相对运动，在转子绕组中感应电势产生电流。由于磁链不能突变，即类似短路时情况

1. 直接外施负序电压

$$\frac{1}{x_-} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right), \quad x_- = \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''}$$

2. 经外接电抗 x_e （很大）施加负序电压

$$\frac{1}{x_- + x_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d'' + x_e} + \frac{1}{x_q'' + x_e} \right), \quad x_- \approx \frac{1}{2} (x_d'' + x_q'')$$

3. 外接电抗 x_e 与负序电抗相当时 $x_- = \sqrt{x_d''x_q''}$

如两相短路时

VII 静止法测定瞬态电抗

- ▶ 试验方法：定子绕组的一相开路，另两相串联并外施一单相低压交流电源：两相短路。转子励磁绕组由电流表短接
- ▶ 缓缓转动转子，定子电流和转子电流将发生变化，记录定子外施电压和定子电流
- ▶ 当转到转子直轴时，转子绕组中的感应电流最大，定子电流最大；当转至转子交轴时，转子绕组中的感应电流最小，定子电流最小

$$x_d'' = \frac{U}{2I_{\max}}$$

$$x_q'' = \frac{U}{2I_{\min}}$$

如转子无阻尼绕组，则测出的是瞬态电抗

x_d' 和 x_q'

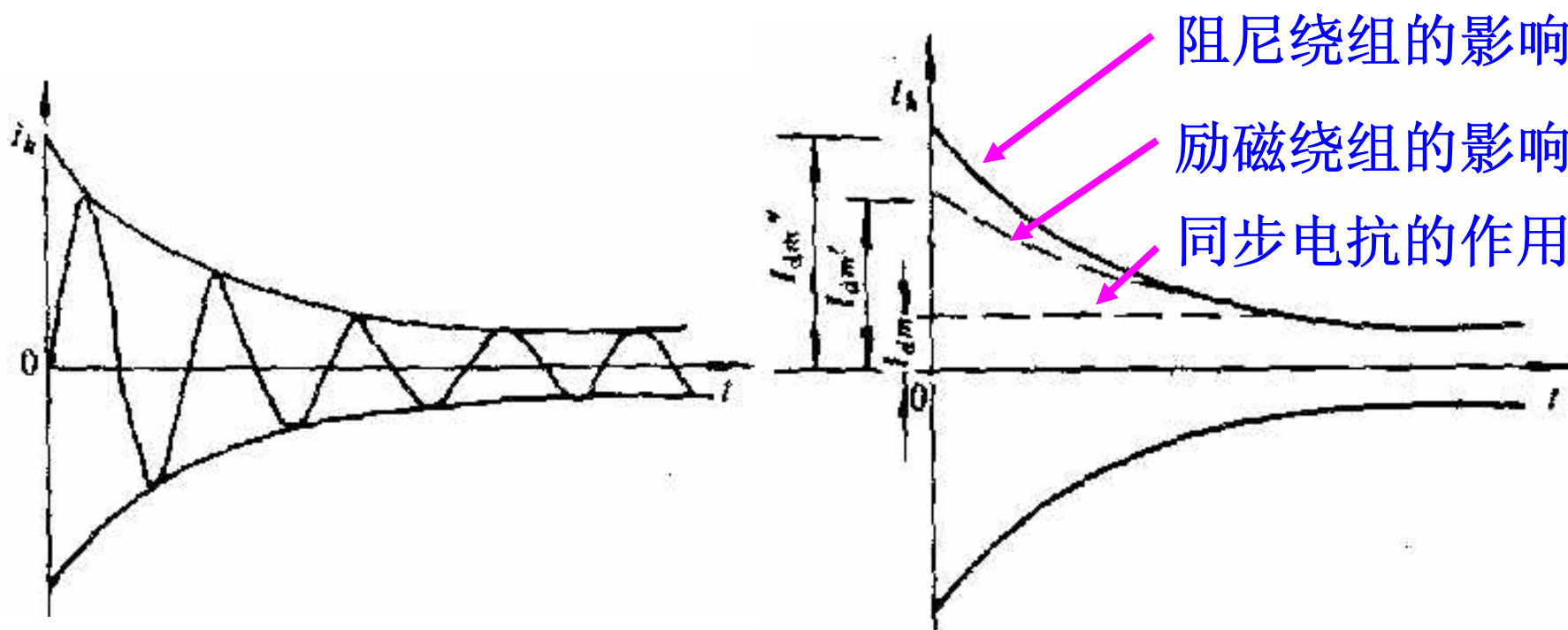
3. 三相突然短路电流

- 短路初瞬，定子电流中的直流分量与短路时的磁链有关（保持短路后磁链守恒）
 - 如短路时短路绕组与交轴重合，则磁链 $\psi_0 = 0$
 - 如短路时短路绕组与直轴重合，则磁链 $\psi_0 = \psi_{\max}$

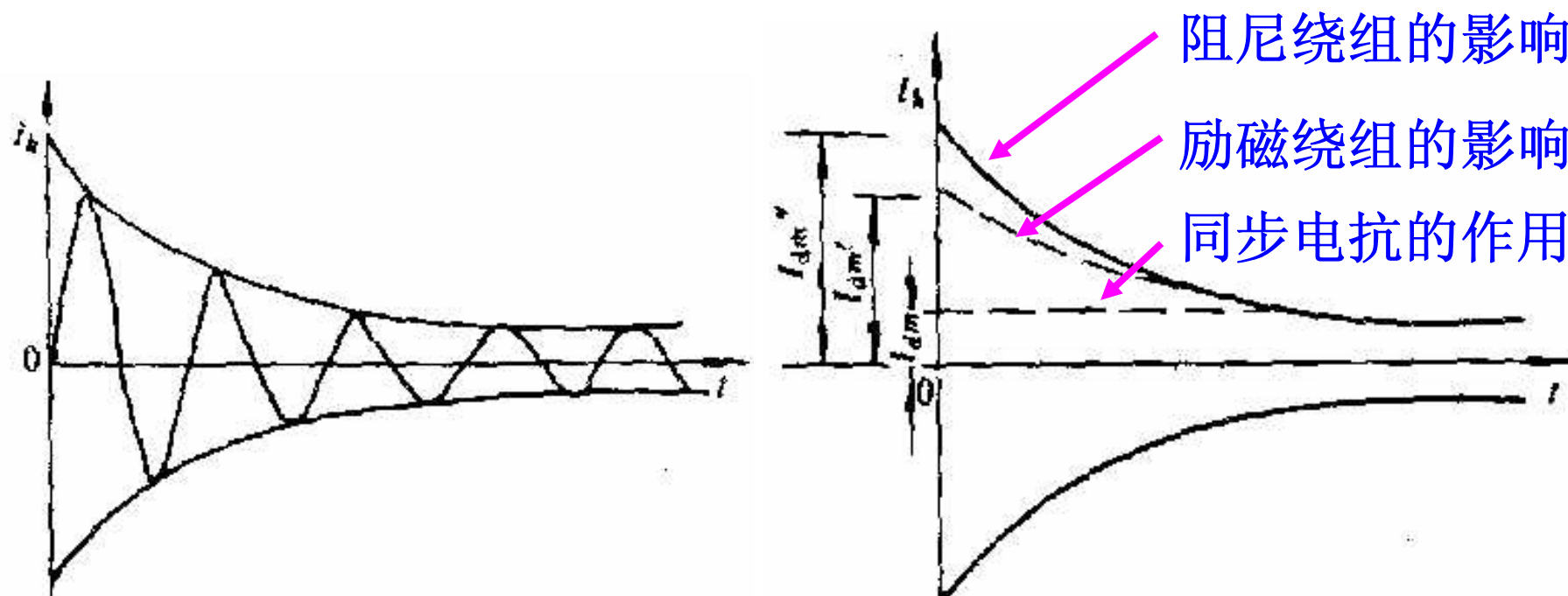
相应的短路电流中直流分类不相同，短路电流也不同。

I 当 $\psi_0=0$ 时的突然短路

- 当 $t=0$ 时, $\psi = \psi_0 = 0$, $E_0 = E_{\max}$, I_k 滞后 E_0 90° , $I_{k0}=0$
- 短路电流中直流分量 $I_- = 0$, 只有交流分量且 $I_{k0}=0$



I 当 $\psi_0=0$ 时的突然短路

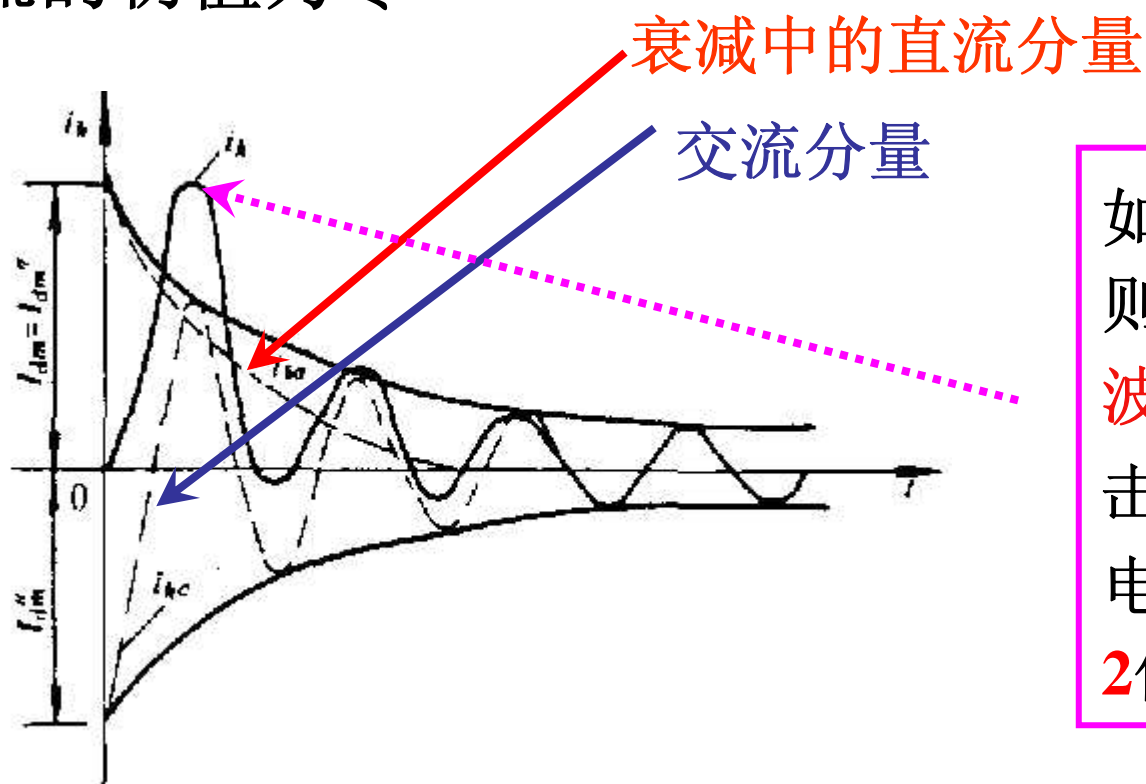


$$i_k = \left[\left(I''_{dm} - I'_{dm} \right) e^{-\frac{t}{T''_{d3}}} + \left(I'_{dm} - I_{dm} \right) e^{-\frac{t}{T'_{d3}}} + I_{dm} \right] \sin \omega t$$

$$= E_{0m} \left[\left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_{d3}}} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_{d3}}} + \frac{1}{x_d} \right] \sin \omega t$$

II 当 $\psi_0 = \psi_{\max}$ 时的突然短路

- 初始条件：当 $t=0$ 时，绕组电流必须保持为零
- 当 $t=0$ 时， $\psi = \psi_0 = \psi_{\max}$ ， $E_0 = 0$ ， I_k 滞后 E_0 90° ， $I_{\sim 0} = -I_{\max}$
- 短路电流中有非周期性的直流分量 I_- ，且 $I_- = I_{\max}$ ，使总电流的初值为零

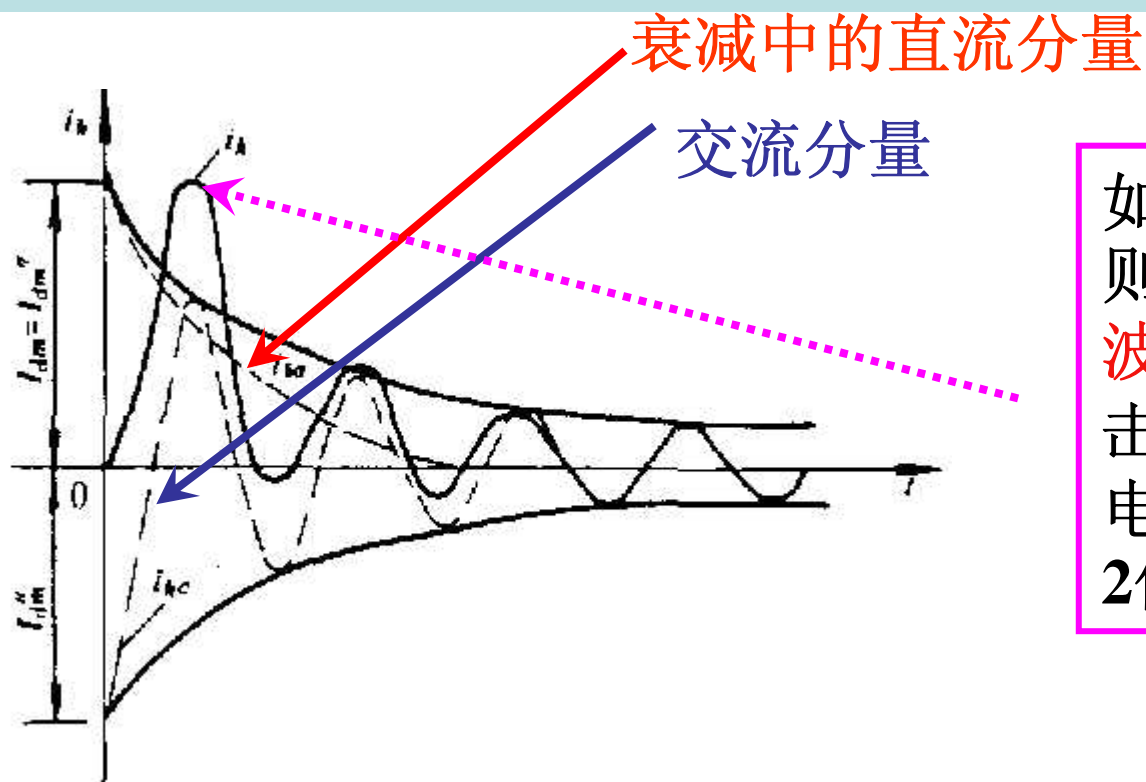


如果衰减很缓慢，则在0.01s (半个周期) 以后，最高冲击电流达到周期性电流的起始振幅的2倍

II 当 $\psi_0 = \psi_{\max}$ 时的突然短路

$$i_{ka} = I_{am} e^{-\frac{t}{T_{a3}}}$$

$$i_{kc} = \left[(I''_{dm} - I'_{dm}) e^{-\frac{t}{T''_{d3}}} + (I'_{dm} - I_{dm}) e^{-\frac{t}{T'_{d3}}} + I_{dm} \right] \sin(\omega t - 90^\circ)$$



如果衰减很缓慢，则在0.01s(半个周期)以后，最高冲击电流达到周期性电流的起始振幅的2倍。

4. 同步电机振荡的物理概念

- 当同步电机运行时，合成磁场和转子磁场间可看着弹性关系：当负载增大时，位移角 δ 增大，相当于将磁力线拉长；当负载减小时，位移角 δ 减小，磁力线缩短；
- 当负载突然变化时，由于弹性作用，转子位移角不能立刻达到新的稳定值，即引起**振荡：转子转速在同步速上下晃动**。如振幅过大，则位移角变化角大，超过弹性极限，将与电网失步；
- 当同步发电机由不均匀的原动机拖动时，将发生强制振荡；
- 如相近容量的两台发电机并列运行，一台发电机的振荡将引起另一台发电机的振荡，即电网电压的振荡。

作业

- 习题: $p. 308:$ 15-2
- 要求: 用标么值进行分析计算